

## Conséquences des rechargements massifs sur la morphodynamique d'un système de flèches sableuses parallèles : l'exemple du port de Dunkerque

Adrien CARTIER <sup>1</sup>, Emmanuel BLAISE <sup>2</sup>

1. Géodunes, 56 rue de la république, 59430 St Pol sur Mer, France.  
[cartier@geodunes.fr](mailto:cartier@geodunes.fr)
2. Université du Littoral Côte d'Opale, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, UMR LOG CNRS-Université de Lille-ULCO-IRD, 62930 Wimereux, France.  
[emmanuel.blaise@univ-littoral.fr](mailto:emmanuel.blaise@univ-littoral.fr)

### Résumé :

La façade maritime du port de Dunkerque est définie par une cellule hydrosédimentaire (UG4) où l'on distingue deux grandes entités morphologiques : à l'est, le secteur est composé d'un mince estran accolé à une digue en enrobé. A l'ouest, un mince cordon dunaire (les Dunes du Clipon), est adossé à un ensemble de défenses portuaires et domine une plateforme vaso-sableuse dite « Zone des Sternes » protégée par deux flèches à pointe libre sablo-graveleuse enracinées sur les ouvrages de protection du Terminal Méthanier. Actuellement, ces deux flèches migrent rapidement vers l'est sans pour autant démaigrir en raison des apports de sédiments artificiels du port. En conséquence, elles modifient fortement la circulation hydrodynamique de l'estran et menacent de fermeture la Zone des Sternes.

### Mots-clés :

Flèche à pointe libre, Rechargement de plage, Suivi topo-morphologique, Photogrammétrie, Drone, Continentalisation, Grand Port Maritime de Dunkerque.

### 1. Introduction

Ces dernières décennies, les flèches littorales à pointe libre ont fait l'objet de nombreuses études, notamment sur les littoraux français où elles peuvent être composées de sable voire de dunes (ALLARD *et al.*, 2008 ; YONI 1995) ou de galets (DOLIQUE & ANTHONY, 1999 ; STEPHAN, 2008 ; SUANEZ *et al.*, 2018). Les systèmes de doubles flèches sont moins répandus que les flèches « uniques » communes et de fait, moins présents dans la littérature scientifique. Certains, comme le système de doubles flèches de Moustierlin (sud Finistère), se sont construits ancrés à un cap rocheux depuis lequel les deux flèches ont progradé dans des directions opposées du fait de dérives littorales divergentes (GUILCHER, 1948 ; YONI, 1995). A l'inverse d'autres se font face et peuvent prendre la forme de systèmes dits « en chicane », comme c'est le cas au niveau des doubles flèches de Mengleuz et du Loc'h, présentes en rade de Brest (STEPHAN *et*

## Thème 2 – Dynamique sédimentaire

*al.*, 2005). En revanche, les systèmes de flèches évoluant subparallèlement entre elles et par rapport à la côte sont très peu observés et donc absents de la littérature. Le système de flèches subparallèles de la zone des Sternes sur le secteur du Clipon, situé sur le territoire du Grand Port Maritime de Dunkerque, constitue un exemple peu fréquent de ce type de configuration morphologique et trouve en partie son origine dans les rechargements de sable massifs effectués au droit de l'Avant-Port Ouest de Dunkerque. En effet, le développement du port depuis les années 1930 s'est accompagné d'une forte pression sur la circulation hydrosédimentaire de ses eaux côtières. Les deux avant-ports bloquent le transit sédimentaire littoral et sont à l'origine d'une érosion quasi constante de l'ensemble de la cellule sédimentaire (SMCO, 2003 ; SPODAR, 2018). Dans ce contexte, et soucieux de vouloir protéger sa façade littorale vis-à-vis du risque d'érosion et de submersion marine, le Grand Port Maritime de Dunkerque s'est doté en 2019 d'un Plan de Gestion du Trait de côte (CARTIER *et al.*, 2020). Ce plan technique et opérationnel vise à valoriser les sédiments issus des dragages d'entretien sous la forme de rechargements de plage sur les secteurs sensibles et/ou nécessitant une protection particulière. La plage située au droit du Terminal Méthanier est donc concernée par des rechargements réguliers afin de mettre en protection la digue du Ruytingen. Ces apports alimentent par la même occasion l'ensemble du système côtier situé en aval-dérive, notamment au niveau de la zone des Sternes où les deux flèches se sont formées.

### **2. Contexte morphologique et hydrodynamique du secteur d'étude**

La zone des Sternes est localisée à l'extrémité ouest de la façade maritime du port de Dunkerque au droit des dunes du Clipon (figure 1). Elle est caractérisée par une vaste plate-forme sableuse (>400 m) de très faible pente (<0,1%) où la partie supérieure n'est submergée que lors de marées de fort coefficient et/ou de surcotes se produisant à marée haute en raison de la présence des flèches sableuses qui la ceinture. Cette plate-forme se prolonge vers le large par une plage de 300 m de largeur et de plus forte pente (1,26%) caractérisée par un système de barres et de bâches (CARTIER, 2011). Le haut de plage s'adosse quant à lui à une dune bordière d'une hauteur de 5 m environ et de faible largeur. Le régime tidal sur le littoral dunkerquois est semi-diurne et macrotidal avec un marnage qui oscille entre 3,54 m (Coeff 45) et 5,45 m (Coeff 95). La circulation des masses d'eau liées à la marée est caractérisée par l'alternance des courants de flot et de jusant s'écoulant parallèlement au rivage pouvant être contraints localement par la morphologie de la plage (SPODAR, 2018). En raison de la présence de l'Avant-Port Ouest, la zone est en situation d'abri vis-à-vis des houles modales provenant du secteur ouest.

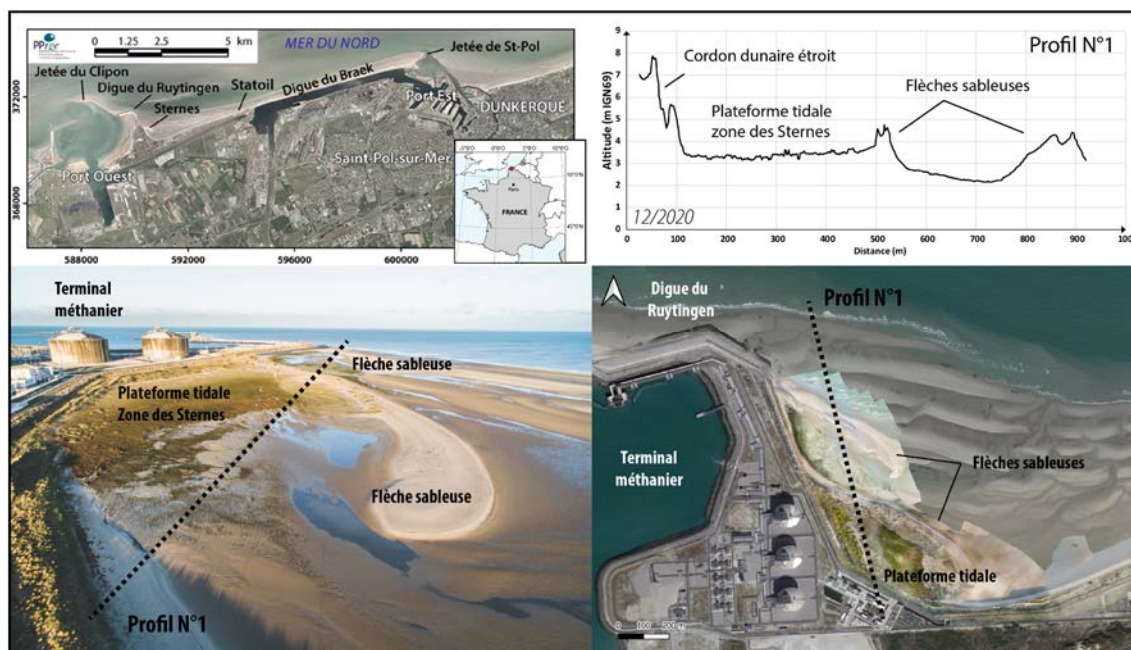


Figure 1. Caractéristiques générales du site d'étude (orthophotographie, photo oblique et profil topographique levés en décembre 2020).

### 3. Méthodologie de suivi pluriannuel

Plusieurs méthodes de mesures topographiques se sont succédées en fonction des différentes thèses et suivis scientifiques (BERTIER, 2009 ; TRESKA, 2013 ; ULCO, 2014 ; SPODAR, 2018 ; GEODUNES, 2022).

Les mesures ont tout d'abord été réalisées au GPS différentiel (2-3 cm de précision) afin de pouvoir générer des Modèles Numériques de Terrain (MNT). Depuis 2019, les MNT et orthophotographies utilisés, désormais de haute précision, sont obtenus par photogrammétrie et survol par drone sur une superficie de 80 ha.

Le littoral des Hauts-de-France, et donc du port de Dunkerque, a également bénéficié de plusieurs campagnes de survol de LiDAR aéroporté réalisées dans le cadre du programme CLAREC (Contrôle par Laser Aéroporté des Risques Environnementaux Côtiers) (2008 et 2011) et du Réseau d'Observation du Littoral de Normandie et des Hauts-de-France (ROL) (2016-2017 et 2020). L'ensemble de ces données nous a permis d'analyser finement la morphodynamique des deux flèches sableuses de la zone des Sternes.

### 4. Résultats

#### 4.1 Analyse diachronique de la topographie des flèches sableuses

En 2008, la zone des Sternes est définie par une unique flèche sablo-graveleuse orientée ONO - ESE (flèche sud), enracinée au milieu de la digue du Ruytingen. Son lobe distal présente une courbure dirigée vers le sud formée par l'action de la houle qui contraint le

## *Thème 2 – Dynamique sédimentaire*

transport des sédiments vers le rivage. De 2010 à 2011, l'enracinement de la flèche sud montre une tendance à perdre du matériel tandis que sa pointe s'allonge et s'exhausse. Le sommet de la flèche évolue très peu, tout comme la plateforme arrière qui reste très stable. Entre 2012 et 2013, environ 3 millions de m<sup>3</sup> de sédiments ont été refoulés au droit de la digue du Ruytingen modifiant considérablement la morphodynamique du secteur. De mars à octobre 2013, le bas de plage présente des accumulations de +0,70 m tandis que le flanc externe de la flèche sud s'est en revanche érodé traduisant un léger recul de l'ensemble du système. D'octobre 2013 à mars 2014 et suite au passage de la tempête Xaver de décembre 2013, le flanc externe de la flèche sud a subi un recul important (-25 m) et un abaissement de sa crête (-0,70 m). Cela étant, une partie du matériel érodé a transité et s'est déposé au niveau de la plateforme. De 2014 à 2017, une deuxième flèche sableuse, a commencé à se constituer au nord de la première, prenant la forme d'accumulations organisées tout d'abord en barres intertidales sableuses obliques, segmentées par de profondes bâches. Entre 2017 et 2020, environ 550 000 m<sup>3</sup> de sédiments ont à nouveau été refoulés sur la plage du Ruytingen rehaussant le niveau de +2 m dans certains secteurs. Ces apports ont contribué à affiner la morphologie de la nouvelle flèche sableuse (flèche nord) et semblent également être à l'origine de la migration de toute la flèche sud vers l'intérieur de la plateforme tidale interne et vers le sud du secteur de manière générale.

### 4.2 Analyse des isobathes

A partir de l'isobathe +3,507 m IGN69, caractérisant la base des flèches sableuses, les vitesses d'évolution des deux flèches ont été analysées conjointement aux opérations de rechargement (figure 2). La vitesse de migration a été calculée à partir de la distance entre la partie distale des corps sédimentaires et le rivage pour la flèche sud ; un point de référence situé sur la zone intertidale pour la flèche nord.

Entre 2008 et 2012, les rythmes d'évolution de la flèche nord sont hétérogènes, passant de +90 m/an entre 2008 et 2010 à -180 m/an entre 2010 et 2011, traduisant une réponse rapide face aux tempêtes hivernales. Dès 2012, la migration et l'allongement de la flèche sud s'accélère avec un rythme de +200 m/an en raison des apports massifs de sédiments provenant des rechargements. De mars 2013 à décembre 2020, la flèche sud est en constante progradation avec un rythme de l'ordre de +40 m/an. Bien que les rechargements aient débuté en 2012, la migration des sédiments depuis la plage du Ruytingen vers l'est et sa réorganisation en une deuxième flèche sableuse semblent avoir été plutôt lentes. Néanmoins à partir de 2017, la flèche sud présente un rythme de migration de +100 m/an, sans pour autant que l'enracinement ne subisse de perte de matériel. Entre janvier 2008 et octobre 2011, le rythme de migration de la flèche sud avant les rechargements était de +10,8 m/an, contre +34,4 m/an entre mars 2012 et décembre 2020.

Ceci suggère une forte relation entre le volume de sédiments disponibles et la vitesse de migration des flèches sableuses de la zone des Sternes.

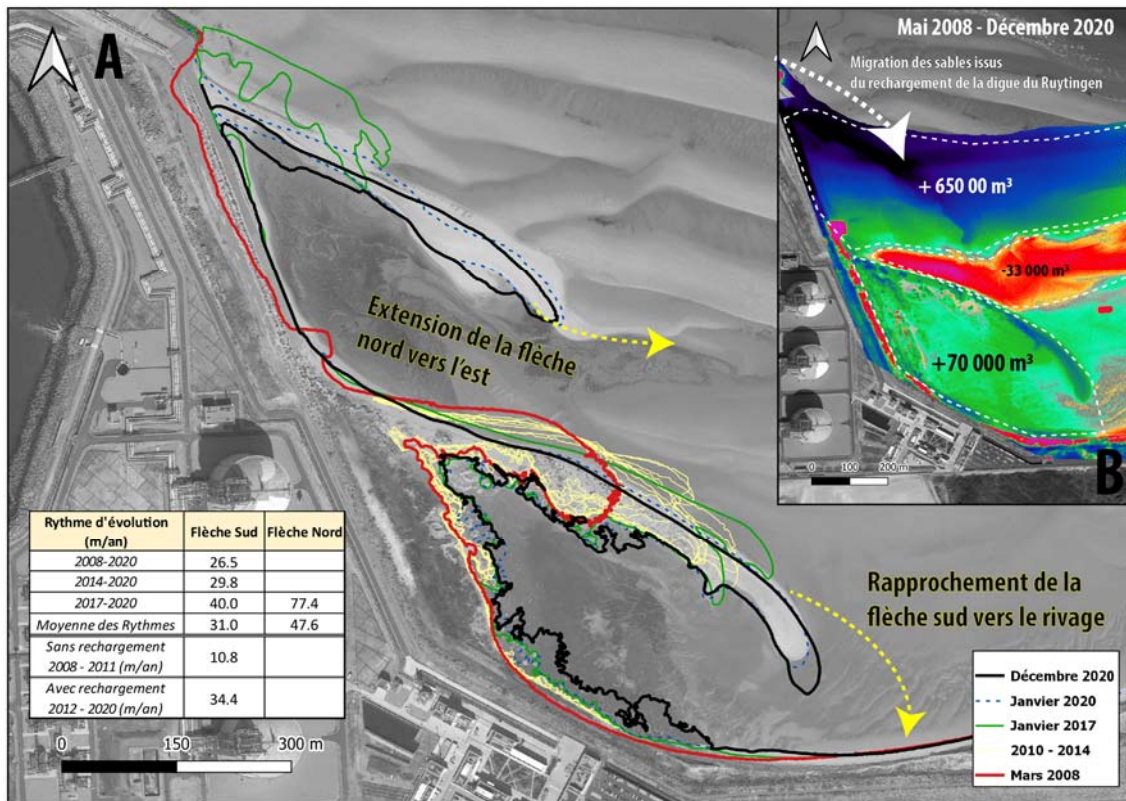


Figure 2. Morphodynamique des flèches sableuses de la zone des Sternes de 2008 à 2020 A) Evolution diachronique de l'isobathe +3.507 m IGN69 ; B) Différentiel altimétrique et bilan sédimentaire.

#### 4.3 Bilans sédimentaires

Avant les rechargements de 2012, le stock sableux de la flèche sud présentait une variabilité plus ou moins saisonnière marquée par une érosion massive de -1700 m<sup>3</sup> faisant suite au passage de la tempête Xaver (2013) (figure 3). De 2017 à 2020, le stock de la flèche sud reste plutôt stable bien qu'elle ait migré de manière significative soulignant une réorganisation interne du stock de sédiments. Entre 2008 et mars 2014, au niveau de l'actuelle position de la flèche nord, les variations de volumes ont été minimales (+/- 300 m<sup>3</sup>) mettant en lumière le peu de sédiments disponibles. Ce n'est qu'à partir d'octobre 2014 que l'accumulation est plus significative avec +5000 m<sup>3</sup> (2014-2017) et +18 700 m<sup>3</sup> (2017-2020), traduisant la migration des sédiments provenant des opérations de rechargement effectuées sur la plage du Ruytingen.

## Thème 2 – Dynamique sédimentaire

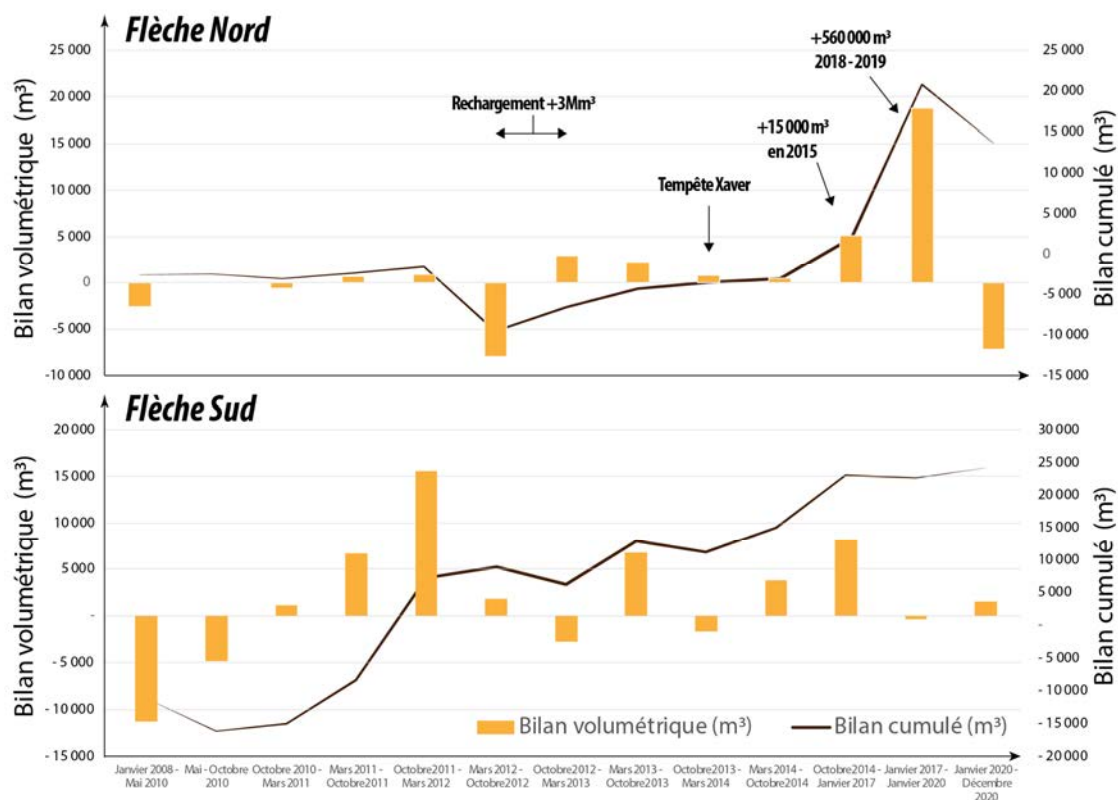


Figure 3. Evolution du stock sédimentaire des deux flèches sableuses entre 2008 et 2020.

### 5. Discussion

L'édification des flèches sableuses et leur évolution ont été contrôlées par les apports massifs de sédiments lors des phases de rechargement de la plage du Ruytingen en 2012, 2018 et 2019-2020. Généralement, une flèche sableuse s'autoalimente suivant le principe de cannibalisation, l'enracinement perdant du matériel pour alimenter la partie distale (OXFORD *et al.*, 1996), mais dans un contexte où la source de sédiments est considérable et encore disponible, la perte de matériaux au niveau de sa base est compensée largement par des transferts longitudinaux liés à la dérive littorale. L'apport massif de matériel a permis d'une part une accélération et une croissance de la flèche sud et d'autre part l'édification d'une nouvelle flèche protégeant la première. En raison d'un stock sédimentaire encore important en 2020 sur la plage du Ruytingen, les calculs de projections basés sur les rythmes passés montrent que la flèche sud pourrait atteindre le rivage à l'horizon 2023-2024, isolant alors la plateforme tidale des Sternes. La partie interne de la plateforme sablo-vaseuse est actuellement inondée pendant seulement 1% de l'année. Avec la fermeture de la plateforme, la végétation halophile serait vraisemblablement remplacée par de la végétation halophobe avec une potentielle accélération de la déflation éolienne et l'édification d'un nouveau complexe dunaire. La

progradation rapide de la flèche nord vers l'est pourrait toutefois constituer une barrière au transit sédimentaire qui alimente la flèche sud tout en la protégeant des vagues lors d'événements tempétueux. Ces phénomènes ralentiraient ainsi la potentielle continentalisation de la zone des Sternes. La fermeture totale de cette plateforme vaseuse à fort intérêt écologique engendrerait ainsi une modification profonde de l'habitat et une perte probable de biodiversité. Son isolement permettrait cependant d'augmenter le niveau de protection des infrastructures portuaires vis-à-vis des aléas érosions et submersions marines en repoussant le trait de côte de plus de 250 m vers la mer. La politique locale de gestion de littoral se voit donc tiraillée entre la sauvegarde de la biodiversité et la protection des infrastructures anthropiques.

## 6. Références bibliographiques

- ALLARD J., BERTIN X., CHAUMILLON E., POUGET F., (2008). *Sand spit rhythmic development: A potential record of wave climate variations? Arçay Spit, western coast of France*. Marine Geology, Vol. 253, n°3-4, pp 107-131. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2008.05.009>
- BERTIER J. (2009). *Analyse multi-échelle de la morphodynamique d'une plage artificielle, avant-port ouest de Dunkerque (Nord de la France)*. Thèse de Doctorat, Université du Littoral Côte d'Opale, Dunkerque, 315 p. Disponible en ligne sur URL <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00463152>
- CARTIER A, TRESCA A, FORAIN N, COTONNEC G, HEQUETTE A. (2020). *Valorisation du sable issu des dragages d'entretien pour la lutte contre l'érosion côtière : le cas du port de Dunkerque*. XVI<sup>ème</sup> Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, Le Havre, pp. 591-598. DOI:10.5150/jngcgc.2020.066
- CARTIER A., RUZ, M.-H., MARIN D., SIPKA V. (2014). *Suivi morphosédimentaire de l'UG4 (Grand Port Maritime de Dunkerque) : bilan 2010 - 2014*. Rapport préparé pour le Grand Port Maritime de Dunkerque, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences - UMR LOG CNRS-Université de Lille-ULCO-IRD / Université du Littoral Côte d'Opale, Dunkerque, p. 33.
- CARTIER A. (2011). *Évaluation des flux sédimentaires sur le littoral du Nord-Pas de Calais : vers une meilleure compréhension de la morphodynamique des plages macrotidales*. Thèse de doctorat, Université du Littoral Côte d'Opale, Wimereux, 376 p. Disponible en ligne sur URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00821126>
- DOLIQUE F., ANTHONY E. (1999). *Influence à moyen terme (10-100 ans) d'un estran sableux macrotidal sur la stabilité d'un cordon de galets : la flèche de Cayeux (Picardie, France)/Medium term (10-100 yrs) influence of a macrotidal sandy foreshore on the stability of a gravel barrier: Cayeux spit (Picardy, France)*. Géomorphologie : relief, processus, environnement, vol. 5, pp 23-38. <https://doi.org/10.3406/morfo.1999.973>

## Thème 2 – Dynamique sédimentaire

- GÉODUNES. (2022). *Suivi morphodynamique des plages de l'UG3 et UG4, Dunkerque Port*. Rapport Annuel - Suivi 2021, Grand Port Maritime de Dunkerque, p. 131
- GUILCHER A., (1948). *Le relief de la Bretagne méridionale de la baie de Douarnenez à la Vilaine*. Thèse de doctorat, Université de Paris, 682 p. Disponible en ligne sur URL : <https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/tel-03126756>
- ORFORD J.D., CARTER R.W.G., JENNINGS C.S. (1996). *Control domains and morphological phases in gravel-dominated barriers of Nova Scotia*. Journal of Coastal Research, Vol 12, n°3, pp 589-604.
- STEPHAN P., (2008). *Les flèches de galets de Bretagne : morphodynamiques passée, présente et prévisible*. Thèses de doctorat, Université de Bretagne Occidentale, Brest, 561 p. Disponible en ligne sur URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00355047>
- STEPHAN P., FICHAUT B., SUANEZ S. (2005). *Les cordons littoraux de Mengleuz (Logonna-Daoulas) et du Loc'h de Landevennec : aspects récents et actuels de l'érosion de deux flèches de galets en rade de Brest*. Bulletin de la Société Géologique et Minéralogique de Bretagne, vol. Série D, n° 2, pp 1-19.
- SPODAR A. (2018). *Analyse morphodynamique de rechargements sédimentaires sur le littoral du nord de la France : le cas de la façade portuaire de Dunkerque*. Thèse de doctorat, Université du Littoral Côte d'Opale, Wimereux, 368 p. NNT : 2018DUNK0475ff. [fftel-02182029f](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02182029f)
- SMCO. (2003). *Plan littoral d'action pour la gestion de l'érosion*. Syndicat Mixte de la Côte d'Opale, 70 p.
- SUANEZ S., STEPHAN P., FLOC'H F., AUTRET R., FICHAUT B., BLAISE E., ACCENSI M. (2018). *Fifteen years of hydrodynamic forcing and morphological changes leading to breaching of a gravel spit, Sillon de Talbert (Brittany)*, Géomorphologie : relief, processus, environnement, Vol. 24, n°4, pp 403-428. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.12677>
- TRESCA A. (2013). *Contrôle souple de la dynamique éolienne sur un littoral artificialisé et propositions de gestion : le cas de la façade maritime du grand port de Dunkerque*. Thèse de doctorat, Université du Littoral Côte d'Opale, Dunkerque, 398 p.
- YONI C. (1995). *Dynamique des flèches dunaires à pointe libre de Bretagne*. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale, Brest, 348 p.